УДК 621.376.2:621.372.8

ОПТИМИЗАЦИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СКАНИРУЮЩИМ СРЕДСТВОМ ОБЪЕКТОВ С ПЕРЕКРЫТИЕМ ИЗОБРАЖЕНИЙ

С.М. Слободян

Инновационный центр «ТЕСТ». г. Томск
E-mail: IC_Test@ inbox.ru

Исследовано обнаружение оптически наблюдаемых близко расположенных объектов с перекрытием изображений. Анализ проведен на примере источников с импульсной модуляцией оптического сигнала. Определены оптимальные параметры сканирования и модуляции. Дана количественная оценка возможности статистического разделения одного изображения объекта на фоне другого.

Высокая степень обеспечения предельной чувствительности и помехоустойчивости при высокой разрешающей способности в достаточно широком спектральном интервале оптического диапазона длин волн и значительном быстродействии в широком поле наблюдения дают сканирующим и следящим оптическим и телевизионным средствам потенциальные преимущества над многими другими традиционными. Кроме того, эти средства допускают возможность простой аппаратурной реализации с большей энергетической эффективностью и более высокими скоростями обработки массива видеоданных. Совокупность перечисленных преимуществ этих средств стимулирует активные исследования их потенциальных возможностей и существующих для них ограничений по повышению предельно достижимых характеристик. Одним из таких ограничений является аберрационный фактор среды распространения, оптических и электронных элементов передачи и преобразования полезного оптического и электронного сообщения, существенно влияющий на разрешающую способность сканирующих средств.

В [1] рассмотрены принципы работы сканирующих и телевизионных средств по группе объектов, раздельно разрешаемых приемной оптикой, изображения которых не перекрываются. Объекты и их изображения в такой группе могут быть идентичными и иметь близкие или одинаковые признаки (интенсивность, частоту модуляции излучения, геометрические размеры или [2] текстуру изображения и т.п.), отличающие их от внешнего фона и сосредоточенных помех.

При пространственном разносе объектов меньше релеевского интервала их разрешения, который в дисперсионных средах типа земной атмосферы существенно увеличивается, раздельно разрешаемые в пространстве объекты в пространстве изображений могут быть уже раздельно не разрешаемыми. Примеры таких ситуаций [3–7]: одновременная диагностика двух и более лазерных пучков в случайно-неоднородной среде, наведение серии управляемых снарядов на цель и т.д. В этих практических ситуациях имеет место малый пространственный разнос изображений объектов, так что их оптические или электронно-оптические изображения в плоскости приемника изображения (ПИ) перекрываются полностью или частично (пространственное перекрытие). Кроме того, в сканирующих средствах на одноэлементных ПИ, элемент сканирования будет перекрывать раздельно разрешаемые приемной оптикой изображения объектов, расстояние между которыми не превышает размера элемента ПИ (временное перекрытие). В обоих случаях на выходе ПИ появляется сигнал, вызванный суммарным воздействием сигналов или оптического излучения от близко расположенных объектов, не разрешаемых ПИ сканирующего средства. Вполне естественно, что обнаружение каждого из них будет весьма затруднено. В сканирующих оптических и телевизионных средствах слежения за объектами с перекрывающимися изображениями необходимо выполнить жесткие условия на соотношение соответствия оптимальности параметров средств реально решаемой задачи по раздельному наблюдению и контролю пространственно разнесенных с возможным перекрытием изображений объектов.

Проблема раздельного обнаружения и распознавания сигналов и объектов с перекрытием изо-

бражений и спектров представляет значительный интерес даже без учета флуктуационного воздействия атмосферного канала наблюдения и внутрисистемного шума. Так, в [7] рассмотрены некоторые аспекты приема и разделения неортогональных оптических сигналов от близко расположенных объектов. В частности, показано, что учет квантовой структуры сигнала приводит к дополнительным ограничениям предельно достижимого качества приема. Например, для корреляционного обнаружителя сигналов от двух близко расположенных объектов, когда выделение сигналов от обоих объектов одинаково важно по сравнению с обнаружением их как раздельно разрешаемых, происходит уменьшение используемой энергии сигнала в $(1+|\kappa_{вк}|)$ раз ($\kappa_{вк}$ – коэффициент взаимной корреляции перекрывающихся во времени или пространстве сигналов). Изменение коэффициента взаимной пространственной двумерной корреляции для лазерных изображений исследовано в [6].

Рассмотрим влияние пространственно-временного перекрытия изображений близко расположенных объектов с амплитудно-импульсной модуляцией на отношение сигнал/шум в сканирующих средствах с безынерционным ПИ.

Возможны два типа амплитудно-импульсной модуляции сигналов от объектов: изменяется амплитуда и форма импульсов сигнала в соответствии с законом модуляции; изменение амплитуды импульсов происходит с сохранением их формы. Оба типа модуляции сигналов от объектов могут быть созданы трассером объекта, модулятором лазерного излучения или обусловлены влиянием вида функции распределения фильтрующих свойств сканирующего элемента средств контроля и наблюдения за объектом-источником модулированного излучения. При пространственно-временном перекрытии изображений объектов-источников импульсно-модулированных сигналов длительностью $\tau_{иi}$ с тактовым интервалом $T_{иi}$, сигнал на выходе линейного безынерционного ПИ примет вид

$$Z(t)=\sum_{i=1}^{\kappa} Z_i(t),$$

где $Z_i(t)$ – импульсный случайный процесс $Z_i(t)=\sum_{s=-\infty}^{\infty}\xi_i(t-sT_{иi})$, статистические характеристики которого определяются свойствами модулирующего сигнала, влиянием среды его распространения, шума и других параметров системы и факторов влияния. Так, например, для марковского потока импульсов от ИО, подвергнутого модуляции $M(t)$ в соответствии с дискретным законом сканирования:

$$Z(t)=M(t)\sum_{\kappa=-\infty}^{\infty} Q\delta(t-t_j),$$

где Q – заряд фотоэлектронов в импульсе; $\delta(t)$ – функция Дирака; t_j – момент эмиссии фотоэлектрона; $M(t)=[1,\ 0<t<\tau_и;\ 0,\ \tau_и<t<T_x]$; T_x – период следования видеосигнала.

При управляемости объектов перекрытия их изображений можно избежать, «разводя» объекты на расстояние, превышающее предельную по критерию Релея разрешающую способность системы наблюдения. В часто имеющихся на практике случаях, например [3], при проводке транспортных средств по заданным траекториям перемещения, требуется обеспечить наибольшую точность управления и контроля положения объекта. Это отражает тесную связь задачи распознавания (идентификации) и высокоточного управления объектом контроля. Средства и пути достижения целей задач идентификации и управления объектом в основе и по существу противоположны друг другу: при повышении точности управления величина перекрытия изображений увеличивается; для улучшения условий раздельного распознавания объектов – эффект перекрытия изображений следует исключать.

Это объясняется тем, что цель распознавания – идентификации объекта состоит в изучении его свойств, которые выявляются при оценке и анализе характерных для объекта наблюдения реакций на управляющие воздействия. Цель же управления, наоборот, состоит в приведении объектов к аутентичному положению в пространстве и поведению в части проявления их свойств, то есть в навязывании им типичных переходных процессов и перемещения по траектории управления с минимальными особенностями проявления собственных свойств. Независимо действующие друг от друга, возмущение в канале наблюдения и подаваемые на объект специальные сигналы управления во время переходного процесса раскачивают положение объекта и обуславливают случайные смещения изображения. Это приводит к флуктуациям как самих сигналов от каждого из объектов, так и вариациям величины перекрытия их изображений, определяющих уровень их взаимного помеховлияния.

Спектр суммарного сигнала ПИ при воздействии потока излучения от группы κ близко расположенных объектов с пространственно-временным перекрытием сигналов будет равен сумме спектров сигналов его составляющих [4, 5] (рис. 1):

$$G_\Sigma(\omega)=\sum_{i=1}^{\kappa} G_i(\omega). \qquad (1)$$

При интенсивности $\overline{n}_и$ пуассоновского потока излучения описание энергетического спектра импульсного сигнала скважностью $\theta_{сл}$ с периодом следования T_x от изображения i-ого объекта имеет вид:

$$G_i(\omega)=\overline{n}_и\theta_{сл}Q^2[1+N_\tau\frac{2\pi}{T_x}\sum_{S=-\infty}^{\infty}\sin^2(s_i\pi/\theta_{сл})\times$$

$$\times\delta(\omega-\frac{2s_i\pi}{T_x})/(s_i\pi/\theta_{сл})^2]. \qquad (2)$$

Здесь N_τ – среднее число одноэлектронных импульсов в пачке импульсов видеосигнала на интервале T_x; s_i – номер гармоники сигнала.

Для объектов слабой освещенности с пространственно-временным перекрытием сигналов будем считать, что пуассоновская статистика не нарушается. Энергетический спектр (1) суммарного сигна-

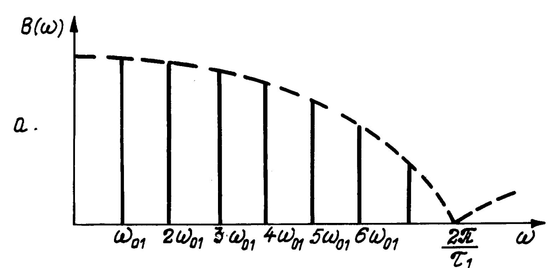
ла от κ близкорасположенных объектов, с учетом разложения (2) на непрерывную $A(\omega)$ и дискретную $B_S\delta(\omega)$ части, примет вид:

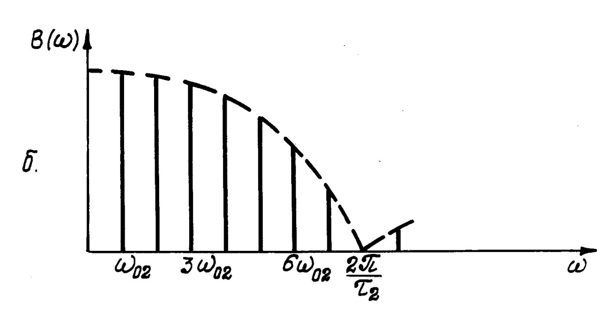
$$G_\Sigma(\omega)=\sum_{i=1}^{\kappa}A_i(\omega)+\omega_{oc}\sum_{i=1}^{\kappa}\sum_{s=-\infty}^{\infty}B_{si}\delta(\omega-s_i\omega_{oi}),\quad(3)$$

где $\omega_{oi}=2\pi/T_{ui}$ – частота первой гармоники сигнала от i-ого объекта; ω_{os} – резонансная частота фильтра для выделения видеосигнала и s_i – номер гармоники сигнала. Мощность, выделяемая сигналом в фильтре, составит

$$P_C+P_Ш=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}G(\omega)\,|\,Z(i\omega)|^2\,d\omega,\quad(4)$$

где индекс "С" и "Ш" – соответственно сигнал и шум; $Z(i\omega)$ – комплексное сопротивление фильтра.





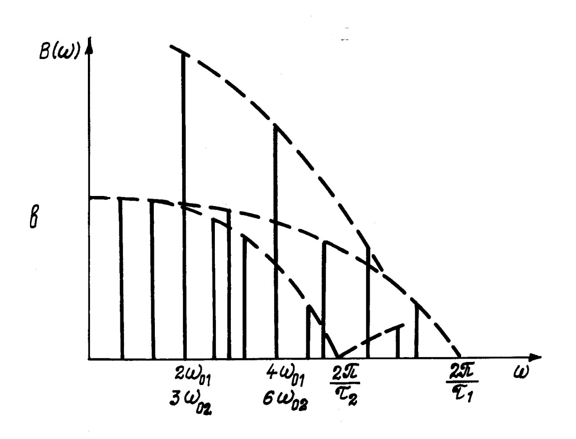


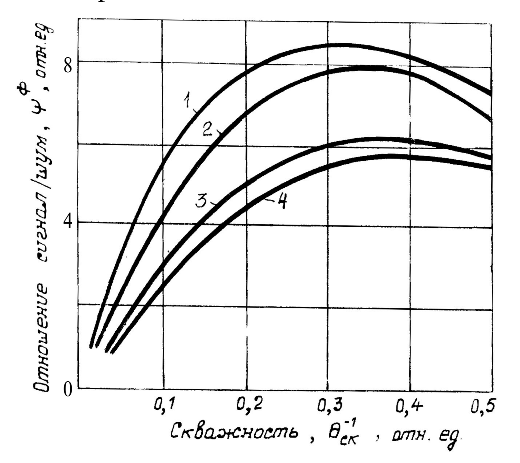
Рис. 1. *Иллюстрация спектра сигнала при наложении изображений близко расположенных объектов*

Эти энергетические соотношения однозначно определяют помехоустойчивость и чувствительность сканирующих систем в режимах обнаружения и слежения. Оценку качества работы этих систем по группе близко расположенных объектов с импульсно-модулированным излучением сведем к вычислению отношения сигнал/шум на выходе фильтра, который определяет статистические характеристики сканирующего средства при обнаружении, слежении и наведении объектов.

Используя методику, изложенную в [1, 4, 5] для вычисления отношения сигнал/шум при приеме одиночного импульсно-модулированного сигнала, и, полагая отношение периодов повторения импульсов принимаемых сигналов от близко расположенных объектов равным $T_i{:}T_j=m_i{:}m_j$ при высокой добротности фильтров $Q_к>>1$, из (4) получим выражение для отношения сигнал/шум при условии выделения сигнала от i-ого объекта на фоне j объектов

$$\Psi_i=\frac{2}{\pi}Q_кB_{1i}\left[\sum_{i=1}^{\kappa}A_i(\omega_{oci})+\sum_{i=1}^{\kappa}\frac{m_i}{m_j}\cdot\frac{B_{si}}{1+4Q_к^2(\frac{m_i}{m_j}-1)^2}\right]^{-1}.\quad(5)$$

Выражение (5) позволяет оценить влияние временного и пространственного перекрытия изображений и сигналов от раздельно не разрешаемых близко расположенных объектов.



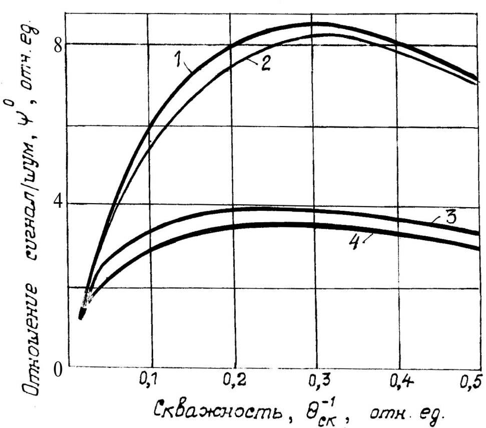


Рис. 2. *Зависимость отношения сигнал/шум от скважности импульсов для случаев сильных (верхний) и слабых (нижний) флуктуаций m_1/m_2, равных: 1) 3/2; 2) 2/3; 3) 4/3; 4) 3/4*

Если примем, что энергетический спектр сигнала каждого из объектов при средней относитель-

ной амплитуде флуктуирующих (в интервале 0...1) импульсов равной 0,5 и ее дисперсии – 0,25 (сильные флуктуации амплитуды) определяется выражением, полученным с учетом [5] и (4):

$$G^{\Phi}(\omega)=\frac{\overline{n}_{ui}\theta_{cкi}Q_{\kappa}^{2}}{2}\left[\begin{array}{l}1+\overline{n}_{ui}\sin c^{2}\left(\frac{\omega\tau_{ui}}{2}\right)+\frac{\pi}{T_{ui}}\times\\ \times\overline{n}_{ui}\sum_{s=-\infty}^{\infty}\sin c^{2}\left(\frac{\pi s_{i}}{\theta_{cкi}}\right)\delta(\omega-s_{i}\frac{2\pi}{T_{ui}})\end{array}\right],\quad(6)$$

где функция sin$c$=sin$x$/x; индекс "Ф" – соответствует флуктуирующим по амплитуде импульсам; "О" – при отсутствии флуктуации. Обозначения здесь аналогичны выражениям (4) и (5). Примем сигналы от объектов равной интенсивности и θ_{CK} скважности: $\overline{n}_{ui}=n_u$; T_1:T_2=m_1:m_2; $\overline{n}_{u2}=n_u\, m_2/m_1$. Тогда, с учетом (4) и (6), из (5) для случая раздельного выделения сигналов от объектов получим:

$$\Psi_{1}^{0}=\frac{Q_{\kappa}\overline{n}_{u}}{\pi}\sin c^{2}\left(\frac{\pi}{\theta_{c\kappa}}\right)(1+\frac{\theta_{c\kappa}\overline{n}_{u}}{\pi}\times$$

$$\times\frac{m_{2}}{m_{1}}\sin c^{2}\left(\frac{\pi}{\theta_{c\kappa}}\right)\left[1+4Q_{\kappa}^{2}(\frac{m_{1}}{m_{2}}-1)^{2}\right]^{-1})^{-1};\quad(7)$$

$$\Psi_{1}^{\Phi}=\frac{2Q_{\kappa}\overline{n}_{u}}{\pi}\sin c^{2}\left(\frac{\pi}{\theta_{c\kappa}}\right)(4+\overline{n}_{u}\sin c^{2}\left(\frac{\pi}{\theta_{c\kappa}}\right)+$$

$$+\overline{n}_{u}\frac{m_{2}}{m_{1}}\sin c^{2}\left(\frac{\pi m_{1}}{m_{2}\theta_{c\kappa}}\right)+\frac{2Q_{\kappa}\overline{n}_{u}}{\pi}\times$$

$$\times\sin c^{2}\left(\frac{\pi}{\theta_{c\kappa}}\right)\left[1+4Q_{\kappa}^{2}(\frac{m_{1}}{m_{2}}-1)\right]^{-1})^{-1}.\quad(8)$$

Поведение зависимостей (7 и 8) представлено на рис. 2. Оценку эффективности фильтрации сигналов от близко расположенных объектов по сравнению с сигналом одиночного объекта проведем, введя понятие энергетического проигрыша равного отношению величин, определяемых по формулам (5, 7 и 8):

$$\chi_{i1}=\Psi_i/\Psi_1.\quad(9)$$

Это выражение устанавливает количественно ухудшение отношения сигнал/шум при раздельном выделении сигнала от i-ого объекта на фоне j близко расположенных объектов группы по сравнению со случаем выделения этого же сигнала, но от одиночного объекта. Как видно из (5), снижение отношения сигнал/шум вызвано, в основном, суммированием непрерывной части спектров сигнала каждого из близко расположенных объектов, но оказывает влияние на величину отношения сигнал/шум и разнос частот модуляции сигналов от объектов – m_i/m_j. Для близких частот модуляции, вследствие конечности величины полосы пропускания фильтра, следует учитывать ухудшение отношения сигнал/шум из-за влияния спектральных составляющих сигналов от других объектов, лежащих в полосе пропускания данного фильтра.

При пространственно-временном перекрытии изображений близко расположенных объектов решающее устройство средства обнаружения при анализе сигналов $Z_1(t)$ и $Z_2(t)$ с выхода фильтров вычисляет апостериорные вероятности $P(Z_1)$ и $P(Z_2)$. Если $P(Z_1) > P(Z_2)$, то принимается решение об обнаружении первого объекта с вероятностью обнаружения $P(Z_1)$. Вероятность ошибки при этом $P(Z_2)=1-P(Z_1)$. Если $P(Z_1)<P(Z_2)$, то принимается решение о необнаружении первого объекта с вероятностью ошибки $P(Z_1)$. Оптимальный обнаружитель объектов на фоне гауссовского шума $n_ш(t)$ со спектральной плотностью $N_0/2$ формирует отношение правдоподобия равное

$$\lambda=P(Z_1)/P(Z_2).$$

Для изображения объектов размером $2r_0$ с одинаковой энергией потока $Э_1=Э_2=\int_0^{\tau_c}Z_1^2(t)dt=\int_0^{\tau_c}Z_2^2(t)dt$ отношение правдоподобия при обнаружении i-ого объекта для $0\le t\le\tau_c$ примет вид

$$\lambda_{i}=\exp\left(\frac{2}{N_{0}}\int_{0}^{\tau_{C}}[Z_{i}(t)+n_{Ш}(t)][Z_{1}(t)-Z_{2}(t)]dt\right),$$

где τ_c – длительность сигнала; $Z_i(t)$ – принятая реализация в процессе обнаружения i-ого объекта.

Вероятность ошибки обнаружения H одного объекта на фоне другого найдется как вероятность полной ошибки различения сигналов $Z_1(t)$ и $Z_2(t)$:

$$H=1-\Phi[\sqrt{Э(1-K_{12})/N_{0}}],$$

которая с учетом приближения [1]

$$\Phi(U)=\sqrt{1-\exp(-4U^2/\pi)}$$

примет вид:

$$H_{i}=\frac{1}{2}(1-\sqrt{1-\exp[-\Psi_{i}^{2}(1-K_{12})/\pi]}),\quad(10)$$

где Ψ_i – отношение сигнал/шум на выходе фильтра канала обнаружения i-ого объекта; K_{12} – коэффициент взаимной корреляции сигналов от первого и второго объектов, который для случая нулевых или равных начальных фаз (с учетом (2.4.11) из [8]) равен:

$$K_{12}=\frac{1}{Э}\int_{0}^{\tau_{C}}Z_{1}(t)Z_{2}(t)dt=$$

$$=\sin\left(\frac{2\pi(m_{1}-m_{2})}{m_{1}T_{2}T_{C}}\right)/\left(\frac{2\pi(m_{1}-m_{2})}{m_{1}T_{2}T_{C}}\right).\quad(11)$$

Коэффициент взаимной корреляции сигналов от объектов минимален ($K_{12\,\min}$=–0,21) при

$$\frac{4}{3T_{2}T_{C}}\cdot\left(\frac{m_{1}-m_{2}}{m_{1}}\right)=1.\quad(12)$$

Из (12) получим, что при раздельном выделении амплитудно-модулированных сигналов от перекрывающихся изображений объектов оптимальное отношение их частот модуляции в сканирующей системе с относительным размером элемента сканирования $a=d_{x,y}/2r_0$ должно удовлетворять соотношению

$$\frac{1}{T_2}-\frac{1}{T_1}=\frac{4r_0\frac{1+a}{a}\sqrt{1+a^2}}{3\upsilon_c}. \qquad (13)$$

Оптимальная υ_C – скорость сканирования при обнаружении объектов с перекрывающимися изображениями с точки зрения достижения максимальной вероятности различения объектов из (13) получается равной

$$\upsilon_{C\ ОПТ}=\frac{3}{4}r_0\frac{1+a}{a}\sqrt{1+a^2}\,\frac{T_1\cdot T_2}{T_1-T_2}. \qquad (14)$$

Оптимальный относительный размер элемента из условия максимума вероятности обнаружения (13) и оптимального значения скорости сканирования (14) составит:

$$a_{ОПТ}=1. \qquad (15)$$

Проигрыш в вероятности обнаружения $1-H_{1,2}$ одного из двух близко расположенных объектов на фоне другого при перекрытии их изображений (или тандемном движении объектов по оси их перемещения) по сравнению с раздельным обнаружением каждого i-ого из них на общем фоне, в том числе [2] текстурном, согласно выражения (10) составит:

$$\frac{1-H_{1,2}}{1-H_i}=\frac{1+\sqrt{1-\exp[-\Psi_{1,2}^2(1-K_{12})/\pi]}}{1+\sqrt{1-\exp[-\Psi_i^2(1-K_{12})/\pi]}}. \qquad (16)$$

Разлагая экспоненту в ряд, сходящийся при любых x, из (16) для малых K_{12} получим:

$$\frac{1-H_{1,2}}{1-H_i}\cong\frac{2+\Psi_{1,2}\sqrt{1+\Psi_{1,2}^2/8}}{2+\Psi_i\sqrt{1+\Psi_i^2/8}}. \qquad (17)$$

Из (16) и (17) видно, что вероятность раздельного обнаружения и идентификации коррелированных сигналов будет являться функцией их энергии и степени пространственной и временной корреляции. При минимальном коэффициенте взаимной корреляции (формула 12), малых значениях контраста и отношения сигнал/шум выражения (16) и (17) приводятся в первом приближении к виду

$$\frac{1-H_{1,2}}{1-H_i}\cong\frac{2+\Psi_{1,2}}{2+\Psi_i}.$$

Таким образом, количественное значение проигрыша в вероятности обнаружения одного из близко расположенных объектов на фоне другого при раздельном различении их сигналов может быть определено для конкретных значений параметров сигналов с учетом вышеизложенного.

В режиме обнаружения и слежения за группой объектов на эффективность различных методов выделения и обработки сигналов от объектов, в том числе по текстурным признакам и вейвлет-анализу [2, 9], оказывают влияние большой ряд других факторов [1, 4]: статистика флуктуаций оптического сигнала, алгоритм следящего сканирования, способ формирования сигнала ошибки, соотношение размеров элемента и изображения объекта, динамика движения объекта, степень астатизма и добротности сканирующего средства, точность слежения и т.п. Влияние нестационарности шума на характеристики сканирующего средства в режимах обнаружения и слежения за группой контрастных объектов может быть исследовано с использованием результатов данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пустынский И.Н., Слободян С.М. Диссекторные следящие системы. – М.: Радио и связь, 1984. – 136 с.
2. Меденников П.А., Павлов Н.И. Обнаружение малоразмерных объектов на текстурном изображении // Оптический журнал. – 2001. – № 4. – С. 82–86.
3. Слободян С.М., Цупин А.А. Лазерные навигационные системы автономных транспортных средств // Зарубежная радиоэлектроника. – 1988. – № 6. – С. 13–20.
4. Слободян С.М. Разработка и исследование в режиме обнаружения устройств на диссекторе для контроля и управления оптическими пучками: Дис. ... канд. техн. наук. – Томск: ТИАСУР, 1978. – 191 с.
5. Слободян С.М. Оценка эффективности приема оптических сигналов от близко расположенных источников // VI Всес. семинар по оптическим и электрооптическим методам и средствам передачи, преобразования, переработки и хранения информации: Тез. докл. – М.: Институт проблем управления АН СССР, 1978. – С. 87–89.
6. Сазанович В.М., Слободян С.М., Чен Б.Н. Экспериментальное исследование корреляции прямой и зеркально-отраженной волн // Оптика атмосферы и океана. – 1989. – Т. 2. – № 7. – С. 710–714.
7. Курикша А.А. Квантовая оптика и оптическая локация. – М.: Советское радио, 1973. – 134 с.
8. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
9. Потапов А.В. Фракталы в радиофизике и радиолокации. – М.: Логос, 2002. – 348 с.